

터널 원지반의 그라우팅 보강 평가를 위한 SASW 기법의 적용

Application of the SASW Method to the Evaluation of Grouting Performance for a Soft Ground of a Tunnel

조 미 라*¹ Cho, Mi-Ra

강 태 호*² Kang, Tae-Ho

Abstract

Fissured rock and soft ground always suggest, problems in the construction of the underground space. The stress release of the weak underground material by opening the underground space with a soft ground, fissures and joints can lead to the failure of the opening. Grouting of the weak rock and the soft ground, which is a process of injecting some bonding agents into the soft ground, is one of the measures to reinforce the soft ground and to prohibit the failure of the underground construction due to the stress release. The proper installation of the grouting is essential to ensuring the safety of the tunneling operation, so that the evaluation of the grouting performance is very significant. The general procedure of evaluating the grouting is coring the grouted section and measuring the compression strength of the core. However, sometimes when the grouted section is at the crown of the tunnel and the grouting is installed at a wide section, the coring is not good enough. This study is oriented to propose a new and a non-destructive procedure of evaluating the grouting performance. The proposed method is based on the wave propagation of elastic waves, and evaluates the shear stiffness of the ground and investigates the anomalies such as voids and cracks. The SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) method is one of the candidates to make the inspection of the grouting performance, and is adopted in this study. The practical grouting activity was monitored by SASW method, and the proposed method was applied to the inspection of the grouting performance to check the verification of the proposed method.

요 지

일반적으로 터널이 풍화암, 파쇄대 또는 토사 구간을 관통할 경우, 터널의 구조적 안정을 확보할 목적으로 그라우팅으로 지반을 보강한 후에 터널 굴착을 하게 된다. 터널 시공의 안정성과 경제성을 확보하려면 각 지반조건에 적합한 공법을 선택하여 그라우팅 설계와 시공이 진행되어야 하고, 신뢰성 있는 그라우팅의 시공을 위해서는 그라우팅 시공 후 그라우팅의 성능평가가 이루어져야 한다. 지금까지의 그라우팅의 평가는 한정된 개수의 코아에 대한 압축강도 시험으로 수행되었으나, 이러한 방법으로는 보강된 지반의 전반적인 그라우팅 성능 평가 및 보강 효과의 정량화에 다소 정확성이 결여될 소지가 있다. 본 연구에서는 코아 채취를 통한 일점식 평가를 탈피하고자 SASW 기법을 도입하여 그라우팅의 정량적 성능평가 방법을 모색하고자 하였다. SASW 기법은 재료의 표면에서 비파괴적으로 탄성파를 발진하고 전파된 탄성파를 측정하여 재료의 내부강성구조를 평가하는 방법으로, 지반의 전단강성 구조 및 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가 등에 주로 활용되는 기법이다. 본 연구에서는 터널 1차 라이닝(shotcrete) 표면에서 SASW 실험을 수행하여 터널 원지반에 대한 우레탄 보강의 효과를 터널 원지반의 전단강성 증가와 원지반내의 내부 공동 또는 균열 확인 등의 측면에서 평가하고자 하였다. 그리고, 본 연구에서 제안한 방법의 신뢰성 및 현장적용성을

*1 정회원, 미국 유타주립대학교 토목공학과 박사후 과정 (Member, Post doc, Dept. of Civil Engr., Utah state Univ., headpin875@hotmail.com)

*2 중앙대학교 토목공학과 박사과정 (Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engr., Chung-Ang Univ.)

확인하기 위하여, 실제 경기도 ○○철도 터널에서의 우레탄 그라우팅 성능평가에 본 연구에서 제안한 방법을 시험 적용하였다.

Keywords : Evaluation of grouting performance, Grouting, SASW method, Seismic measurements, Tunnel

1. 서론

최근 국가 경제 성장과 국민 복지환경 조성을 뒷받침할 수 있는 사회간접자본 시설 확충이 지속적으로 요구되고 있고, 우리나라 국토의 지형적 특성과 대도시 중심의 경제산업의 구조적 특성상 지하철과 고속 교통망을 위한 터널의 설계와 시공이 급속히 증대되고 있다. 일반적으로 터널이 풍화암, 파쇄대 또는 토사 구간을 관통할 경우, 터널의 구조적 안정을 확보할 목적으로 그라우팅으로 지반을 보강한 후에 터널 굴착을 하게 된다. 터널 시공의 안정성과 경제성을 확보하려면 각 지반조건에 적합한 공법을 선택하여 그라우팅 설계와 시공이 진행되어야 하고, 신뢰성 있는 그라우팅의 시공을 위해서는 그라우팅 시공 후 그라우팅의 성능평가가 이루어져야 한다. 지금까지의 그라우팅의 평가는 한정된 개수의 코아에 대한 압축강도 시험으로 수행되었으나, 이러한 방법으로는 보강된 지반의 전반적인 그라우팅 성능 평가 및 보강 효과의 정량화에 다소 정확성이 결여될 소지가 있다.

본 연구에서는 코아 채취를 통한 일점식 평가를 탈피하고자 SASW 기법을 도입하여 그라우팅의 정량적 성능평가 방법을 모색하고자 하였다. SASW 기법은 재료의 표면에서 비파괴적으로 탄성파를 발진하고 전파된 탄성파를 측정하여 재료의 내부강성구조를 평가하는 방법으로, 지반의 전단강성 구조 및 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가 등에 주로 활용되는 기법이다. 본 연구에서는 터널 1차 라이닝(shotcrete) 표면에서 SASW 실험을 수행하여 터널 원지반에 대한 우레탄 보강의 효과를 두 가지 측면에서 평가하고자 하였다. 첫 번째는 그라우팅 전후의 쏫크리트(shotcrete)와 원지반의 전파 속도(또는 전단탄성계수)를 측정하여 정량적인 우레탄 보강 효과를 평가하였고, 두 번째는 동일한 SASW 실험으로 측정된 주파수 응답곡선의 진폭스펙트럼을 이용하여 원지반 내에 존재하는 탄성파의 반사면 즉, 수평 균열이나 공동 등의 존재를 정성적으로 평가하였다. 이처럼 본 연구에서는 기존의 코아 채취와 같은 파괴적인 일점식 평가방법보다는 비파괴적으로 보다 넓은 지역

에 대해서 그라우팅의 전반적인 성능평가를 수행하는 방법을 제안하였고, 본 연구에서 제안한 방법을 실제 경기도 ○○철도 터널에서 수행된 우레탄 그라우팅 시공 지역에 대해 시험 적용함으로써 본 연구에서 제안한 방법의 신뢰성, 타당성 등을 검증하고자 하였다.

2. SASW 기법

2.1 SASW 기법의 개요

SASW 실험은 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키는 것으로 시작된다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하는 것이 SASW 실험의 핵심이라고 할 수 있다.

충격 또는 진동에 의해 시작된 응력파 전파의 측정은 발진원과 일직선상에 위치한 두 지점에서 이루어지는데, 이는 충격 지점에서 출발하여 전파되어 나가는 응력파가 첫 번째 감진기에서 두 번째 감진기까지 도달하는데 소요되는 시간을 측정하여 응력파 전파 속도를 측정하기 위함이라고 할 수 있다. 이러한 응력파 전파 속도의 결정은 신호해석 기법인 FFT(Fast Fourier Transform)의 도움으로 여러 가지 주파수 성분의 정현파에 대해 동시에 이루어지게 되는데, 일반적으로 약 400~800개의 다른 주파수의 정현파에 대한 전파 속도를 단 한번의 실험으로 구할 수 있다.

SASW 실험에 의한 응력파의 속도 결정은 특정 주파수를 가지는 정현파에 대하여 두 지점에서 기록된 응력파 진동 간의 위상각 차이(phase difference)를 측정하는 것에 의해서 가능하다. 즉, 두 지점을 통과하는 특정 주파수를 가지는 정현파의 속도 결정은 각 지점에서 측정한

정현파 간의 위상각 차이를 측정하여 정현파의 도달 시간을 계산함으로써 속도 계산이 가능한데, 정현파 간의 위상각 차이는 동적신호분석기(dynamic signal analyzer)에 의해서 실시간으로 측정가능하다. 이러한 정현파의 전파 속도는 위상각을 이용하여 결정되는 것이기에 일반적으로 위상각 속도(phase velocity)라고 한다.

특정 주파수에 대해서 계산된 위상각 속도는 주파수(f) · 위상각 속도(v_{ph}) · 파장(λ) 간의 관계식 $v_{ph} = f \cdot \lambda$ 을 이용하여 파장과 관계로 표현될 수 있다. 즉, SASW 실험에 의해서 결정된 약 400~800개의 위상각 속도는 상응하는 파장과 유일한 관계를 이루게 되는데, 일련의 파장(wavelength)에 대한 응력파의 위상 속도(phase velocity)의 관계를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이 분산곡선은 평가 대상인 부지의 서명(書名)과도 같은 것으로, 특정 부지에 대해서 분산곡선은 유일하게 결정되어진다. 현장에서 실험에 의해 결정된 분산곡선은 실험분산곡선(experimental dispersion curve)이라고 하는데, 이 실험분산곡선은 부지의 S-파 속도 주상도(shear wave velocity profile), 즉, 깊이에 따른 S-파 속도의 분포를 도출하는데 사용이 된다.

S-파 속도 주상도의 도출은 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링 해석(iterative forward modeling analysis)에 의해서 가능하다. 이는 근본적으로 S-파 속도 주상도를 가정하고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 가정한 S-파 속도 주상도를 변화시켜나가는 것이다. 이러한 S-파 속도 주상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링 해석이라고 한다. 반복적 정모델링 해석은 인간의 판단에 의해 수행되기 때문에 무수히 많은 횟수의 시행오차를 거쳐야 이론분산곡선을 실험분산곡선에 일치시킬 수 있는데, 반복적 정모델링으로 구한 S-파 속도 주상도의 정밀도는 극히 저조하여 신뢰성에 다소 문제가 있을 수도 있다. 그러나, 역산해석에 의한 기법은 최적화 알고리즘에 의하여 가장 적합한 해를 찾기 때문에 객관성 및 높은 정밀도를 유지할 수 있는 장점이 있으며, 또한 S-파 주상도를 구하는 과정에 있어서 반복적 정모델링 기법의 경우처럼 시행오차를 거치지 않기 때문에 시간적인 면에서도 상당히 경제적이라고 할 수 있다.

2.2 SASW 기법에 의한 내부공동 및 수평균열의 평가

SASW 기법은 원래 지반이나 구조물의 전단 강성 주상도를 평가하기 위하여 개발되었고, 현재까지 거의 모든 SASW 적용이 전단파 속도 측정에 국한되어 왔다. 한편, 1990년 이후 SASW 기법이 콘크리트 구조물에 본격적으로 적용되면서, 조성호, 배규진, 나경준 등(1998)은 단순한 탄성파의 위상속도 계산보다는 두 감지기에서 측정된 탄성파 신호를 분석함으로써 매질 내부의 공동이나 수평균열 등의 평가에 관심을 가지기 시작하였다. 조성호, 배규진, 나경준 등의 경우, 터널 벽체 표면에서의 SASW 실험을 통하여 방수막 · 부직포 위치를 추정할 수 있었는데, 이는 탄성파 전파에 있어서 뚜렷한 불연속면이 되는 방수막 · 부직포로 인한 탄성파의 교란 현상을 관찰함으로써 가능하였다. 본 절에서는 조성호, 배규진, 나경준 등(1998)이 제안한 기법을 터널벽체 모델에 대한 수치 해석적 접근을 통하여 정리하였고, 실제로 강원도 ○○터널에 대하여 적용한 사례를 소개하였다.

그림 1은 본 절에서 수행한 수치해석에 사용한 터널벽체의 모델이다. 콘크리트 라이닝이 30cm 두께를 가지고 있고, 그 하부에 3cm 두께의 방수막 · 부직포 층이 있으며, 아래에 슛크리트 층이 존재한다. 콘크리트 라이닝과 슛크리트의 전단파 속도를 2000m/sec, 방수막 · 부직포 층의 전단파 속도를 300m/sec로 설정하였다. 방수막 · 부직포 층의 전단파 속도가 실제보다 다소 과다하게 설정되었는데, 이는 층 간 전단파 속도의 차이를 과다하게 설정할 경우 탄성파 파동전파의 수치 해석적 모델링이 불가능하기 때문이었다. 그러나, 2000m/sec와 300m/sec의 차이는 약 7:1의 차이를 보여주기 때문에, 파동전파의 측면에서는 충분한 불연속면이 된다고 할 수 있다.

본 연구에서 SASW 수치실험을 위하여 사용한 프로그램은 FitSASW(Joh, 2001)로서 Kausel and Roesset

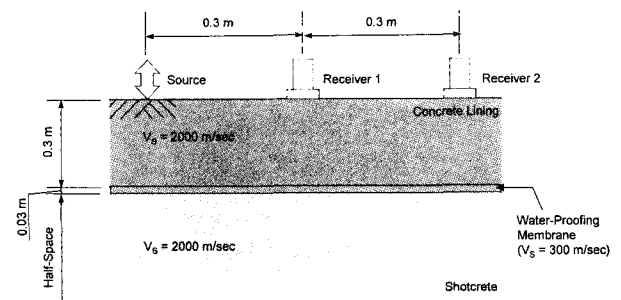


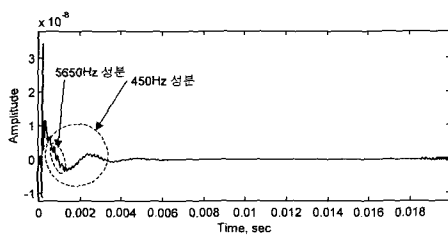
그림 1. 내부공동 및 수평균열 감지를 위한 SASW 실험의 수치해석적 Simulation에 사용한 터널 벽체 모델

(1981, 1982)이 제안한 탄성과 파동전파 해석모델인 동강성행렬법(Dynamic Stiffness Matrix Method)을 구현한 것이다. 동강성행렬법은 해석적으로 전개된 해(analytical solution)를 수치해석적으로 구하는 것으로서 매우 정확한 결과를 제시한다. FitSASW에 의해서 구할 수 있는 것은 표면의 임의 위치에서 주시곡선(time trace), 두 감진기간의 전달함수(위상 및 진폭스펙트럼), 두 감진기에 대한 위상속도 분산곡선 등으로서 SASW 실험을 모사할 수 있다.

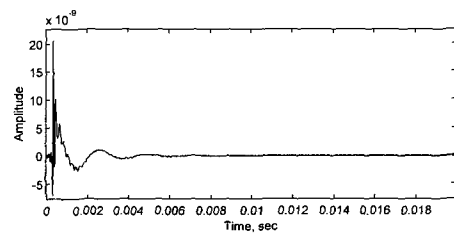
그림 1의 발진원 위치에서 0.078125msec의 시간동안에 삼각형 모양의 충격하중을 가하였고, 감진기 1과 2의 위치에서의 주시곡선은 그림 2에 도시된 바와 같다. 특

히, 그림 2(a)의 감진기 1에서의 주시곡선을 분석하여 보면, 450 Hz 성분과 5650 Hz 성분이 존재함을 알 수 있다. 그리고, 그림 2의 주시곡선에 대하여 푸리에 변환을 수행하여 그 선형 스펙트럼(linear spectrum)을 구해 보면, 그림 3과 같이 된다. 그림 3의 선형 스펙트럼은 그림 2의 주시곡선에서 관찰되는 주파수 성분을 명확하게 제시하여 주고 있고, 감진기 1의 경우 450Hz와 5650 Hz 가 지배적임을 파악할 수 있다. 그런데, 주파수 5850 Hz의 경우 진폭의 크기가 날카롭게 최소치로 감소하였다가 다시 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구는 지배적으로 나타나는 주파수 성분보다는 에너지의 소멸을 나타내는 주파수에 관심을 두고 살펴

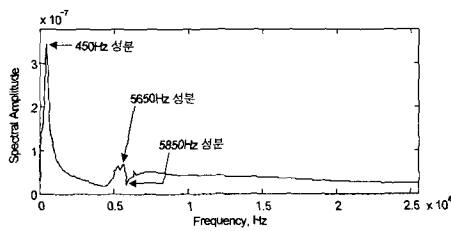


(a) 감진기 1에서의 주시곡선

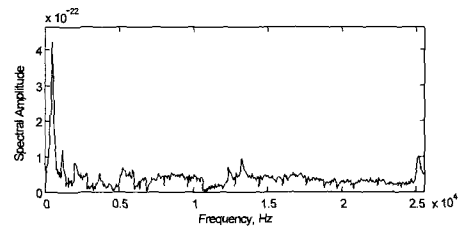


(b) 감진기 2에서의 주시곡선

그림 2. 그림 1의 터널벽체 모델에 대하여 수행한 SASW 실험의 수치해석적 Simulation 결과: 감진기 1, 2에서의 주시곡선

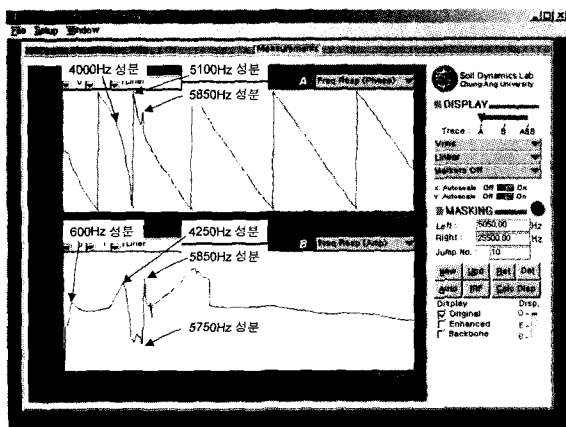


(a) 감진기 1에서의 Linear Spectrum

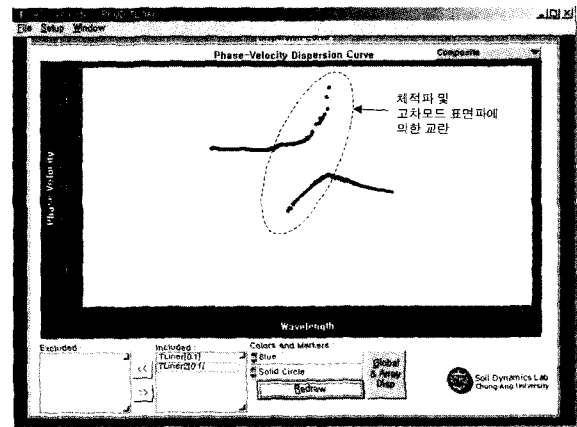


(b) 감진기 2에서의 Linear Spectrum

그림 3. 그림 1의 터널벽체 모델에 대하여 수행한 SASW 실험의 수치해석적 Simulation 결과: 감진기 1, 2에서의 주시곡선에 대한 Linear Spectrum



(a) 감진기 1,2 신호로부터 결정된 전달함수의 위상스펙트럼 및 진폭스펙트럼



(b) 그림 (a)의 위상스펙트럼으로 계산한 위상속도 분산곡선

그림 4. 그림 1의 터널벽체 모델에 대하여 수행한 SASW 실험의 수치해석적 Simulation 결과: SASW 수치실험에 의한 스펙트럼 및 분산곡선

보는 것에 주안점을 두고 있다. 이러한 에너지 소멸 현상은 감진기 1과 2에 대한 전달함수의 진폭스펙트럼을 살펴보면 더욱 분명하게 파악할 수 있다. 그림 4(a)의 하부 윈도우를 살펴보면 주파수가 5750Hz 일 때, 진폭의 크기가 급격히 감소했다가 다시 급격히 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 그리고, 흥미로운 것은 5800Hz에서 위상각 스펙트럼에서도 이상현상이 관찰되고 있다. 즉, 지반 또는 구조물 하부에 탄성파의 불연속면이 존재하는 경우, 전달함수의 진폭스펙트럼에서는 에너지가 소멸되는 현상이 발생하고, 위상스펙트럼에서는 진폭스펙트럼보다는 보다 넓은 지역에 걸쳐서 위상각의 급격한 변화, 위상각 변화추이의 불연속성과 같은 이상현상이 발생한다. 위상스펙트럼에서의 이상현상은 결과적으로 위상속도 분산곡선에 영향을 나타내며, 결과적으로 그림 4(b)에서와 같은 불합리한 위상속도와 분산곡선의 불연속으로 귀결된다. 또한, 감진기 1과 2

를 이용하여 계산한 순간응답곡선(impulse response)에 대한 wavelet 변환결과인 거보스펙트럼(Gabor Spectrum)을 살펴보면, 이상현상이 관찰되었던 주파수를 경계로 하여 두 개의 wave group이 명확하게 구별되고 있음을 확인할 수 있다.

따라서, 지반 또는 구조물 내부에 존재하는 내부공동 또는 수평균열은 탄성파의 파동전파에 이상현상을 초래하게 되고, 그 결과는 전달함수의 진폭스펙트럼, 위상스펙트럼, 순간응답곡선의 거보스펙트럼 등에 특징 있는 현상으로 표출된다. 지반 및 구조물에 대한 SASW 실험 측정결과로부터 구한 각 스펙트럼에서 위에서 언급한 것과 같은 이상현상이 관찰되었을 때, 매질 내부에 내부공동 또는 수평균열이 존재한다고 평가할 수 있다.

본 절에서 제시한 내부공동 또는 층 분리 감지 알고리즘을 강원도 ○○터널 측정결과에 적용하여 보았다. 그림 6에 제시된 것은 SASW 실험으로 측정된 전달함수의 위상스펙트럼, 진폭스펙트럼, 거보스펙트럼으로서 앞에서 언급한 현상들이 각 스펙트럼에서 확인할 수 있다. 즉, 위상스펙트럼의 경우, 방수막·부직포가 존재하는 깊이 약 30cm 위치에서 불규칙적인 변화가 나타났고, 진폭스펙트럼의 경우 동일한 주파수에서 진폭의 크기가 급격히 하강하는 현상이 나타나며, 거보스펙트럼의 경우에서도 문제의 주파수를 경계로 두 개의 wave group이 명확하게 분리됨을 확인할 수 있다. 따라서, 그림 6의 결과가 도출된 강원도 ○○터널의 경우에도 약 30cm 깊이에서 층 분리 현상이 있음을 추정할 수 있다.

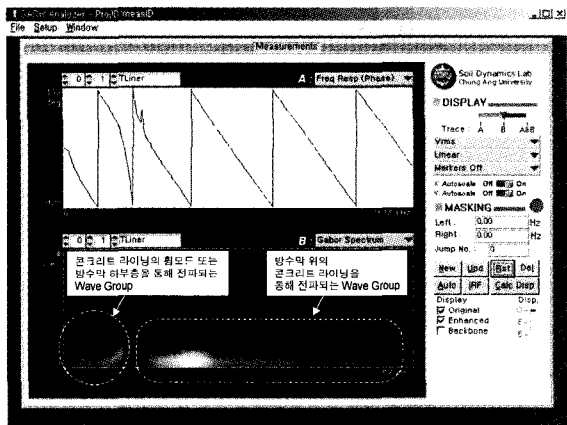
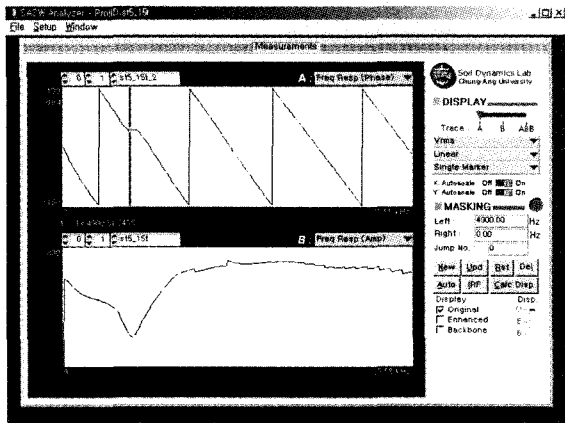
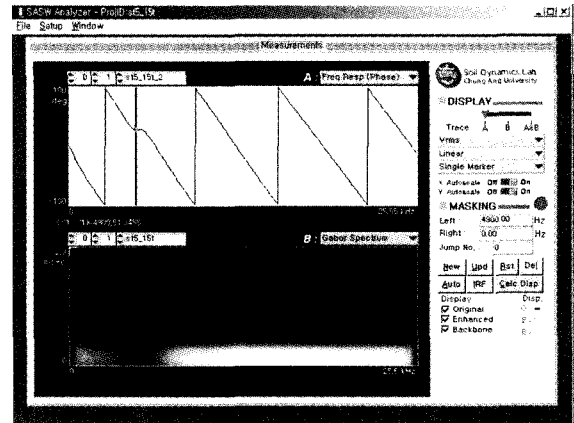


그림 5. 그림 1의 터널벽체 모델에 대하여 수행한 SASW 실험의 수치해석적 Simulation 결과: SASW 수치실험에 의한 거보 스펙트럼



(a) 전달함수의 위상스펙트럼



(b) 거보스펙트럼

그림 6. 강원도 ○○ 터널의 벽체에서 수행한 SASW 실험결과로부터 구한 위상스펙트럼과 거보 스펙트럼

3. SASW 기법에 의한 그라우팅 성능평가 방법의 제안

터널 원지반에 대한 그라우팅은 일반적으로 연약부에 천공을 실시하고, 천공된 홀을 통해 약액을 주입함으로써 수행된다. 시공된 그라우팅의 성능 평가는 그라우팅이 시공된 지역의 코아를 채취하여 코아의 압축강도를 측정하고, 측정된 압축강도의 크기에 의해 그라우팅의 성능에 대해서 평가하게 된다. 그러나, 그라우팅이 터널의 천단부에 시공된 경우 코아 채취가 거의 불가능할 수도 있고, 그라우팅 시공이 비교적 광범위한 지역에 걸쳐서 이루어진 경우 대표성을 가질 수 있는 곳에서 모두 코아를 채취하는 것도 용이한 일이 아니다. 따라서, 본 연구에서는 비파괴적으로 탄성파의 전파특성을 이용하여 그라우팅 성능을 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 구체적으로는 그림 7의 개념도에 도시한 바와 같다.

즉, 그라우팅 시공 대상지역에 대해서 그라우팅 시공 전과 시공 후에 SASW 실험을 수행하여, 전달함수의 위상스펙트럼 및 진폭스펙트럼을 계산한다. 이로부터 깊이별 S-파 속도와 원지반 내에 존재하는 내부공동 및 균열 양상을 파악하고 그라우팅 시공 전후의 상태를 비교함으로써 그라우팅 성능을 평가하는 것이다.

그라우팅재 자체가 큰 강도를 가지고 있거나, 그라우팅재가 경화되면서 부피가 크게 팽창되거나, 고압으로 그라우팅재를 주입하여 부실한 암괴를 서로 조밀하게 밀착하는 경우든지, 또한 암괴사이의 빈 공간을 채워 원지반 내부를 밀실하게 하는 경우, 원지반의 상태는 그라

우팅 시공 전보다 더욱 안정된 상태로 변하게 된다. 이때, 밀실한 구조로 개선된 지반을 통과하게 되는 탄성파는 더욱 빠른 속도로 전파하게 되고, 내부공동이나 균열 등으로 반사 또는 굴절되던 탄성파도 직선의 경로를 따라 전파되게 된다. 따라서, 그라우팅 성능이 양호한 경우는 빠른 탄성파 속도를 보이게 될 것이고, 또한 내부공동 및 균열 또한 거의 발견되지 않을 것이다. 한편, SASW 실험으로 측정된 S-파 속도는 적절한 포아송비에 의하여 P-파 속도로 변환될 수 있으며, 추정된 P-파 속도로부터 이에 상응하는 암반의 상태 즉, 풍화암, 보통암, 연암, 경암, 극경암 등의 형태로 표현가능하기 때문에, 분류된 암반의 종류에 따라 그라우팅 성능을 평가하는 것도 가능할 것이다.

4. 그라우팅 성능평가를 위한 SASW 실험

4.1 현장실험의 구성

경기도 ○○ 철도터널의 우레탄 그라우팅 성능평가를 위하여 SASW 실험을 수행하였다. 우레탄 그라우팅 시공의 성능을 평가하기 위하여 그라우팅 시공전과 그라우팅 시공 후에 SASW 실험을 수행하여 지반강성의 증가를 정량적으로 평가하였고, 또한 내부공동 및 층 분리 측면에서 그라우팅 전후의 상태를 비교하였다.

우레탄 그라우팅이 시공되기 전의 지반강성을 평가하기 위한 SASW 실험은 모두 세 개의 측선 SD, CR에서 수행되었다. 우레탄 그라우팅 시공 계획에 의하면, 우선적으로 터널 슛크리트 표면에서 약 1m 간격의 격자

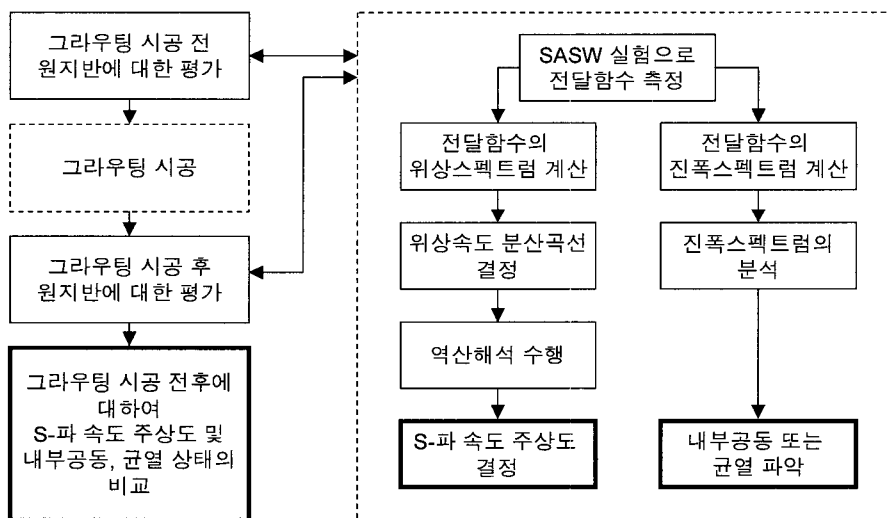


그림 7. 터널 원지반의 그라우팅 보강 평가를 위해 본 연구에서 제안한 방법의 흐름도

표 1. SASW 실험을 위한 감지기간 거리

SASW 실험 축선		감지기간 간격, m	
기호	위치	그라우팅 시공전	그라우팅 시공후
SD	어깨부	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4
CR	천단부	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 5.0	0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 5.0

모양으로 약 6m 깊이로 천공한 후, 천공된 홀에 강관을 삽입한 후에 우레탄 약액을 주입하도록 되어 있다. 따라서, 우레탄 그라우팅 보강효과 평가를 위한 SASW 실험은 표 1에 제시한 바와 같이, 여러 감지기간 간격을 이용하여 수행하도록 하였고, 탄성과 발생을 위한 발진원으로는 손 망치를 사용하였다.

지표면에서 비파괴적으로 수행이 되는 SASW 실험은 일반적으로 조사하고자 하는 심도에 해당하는 거리만큼 떨어뜨려 두 감지기를 설치하게 되는데, 이 때 SASW 실험시 발생시키는 탄성파는 해당심도까지 전파되어야 하기 때문에 상당히 큰 에너지의 충격을 지반에 가해야 한다.

발진원에 의해 야기된 탄성파는 지표면 및 지반 속을 방사방향을 퍼져나가게 되는데, 그 중 대부분의 에너지는 지표면을 따라 전파되며, 지표면을 따라 전파되는 탄성파는 특별히 표면파라고 한다. SASW 기법은 주로 이러한 표면파를 측정하여 분석함으로써 지반의 전단강성구조를 평가할 수 있는데, 지표면에서 표면파의 진동을 측정하기 위한 감진기로는 가속도계를 사용하였다. 이는 본 SASW 실험이 수행된 매질이 쏿크리트 표면이었고 또한 배후 원지반도 암반이어서 전단파 속도가 약 700m/sec 이상으로 예상되는 매우 단단한 지반이기 때문에, 이러한 단단한 매질에서의 지반진동은 고주파를 주성분으로 가지기 때문에 고주파 측정에 효과적인 가속도계를 사용하였다. 또한, 가속도계를 천단이나 측벽부에 접착제를 이용하여 고정시켜 측정을 하여야 하기 때문에, 비교적 가벼운 감진기가 유리한 상황이었다. 본

연구에서 이용한 속도계는 모두 PCB 사의 제품으로 100mV/g의 예민도를 가지는 제품이다.

SASW 기법은 자료 분석 및 해석이 주파수 영역에서 수행되기 때문에 두 감진기로부터의 신호를 실시간으로 주파수 영역으로 변환한 후 현장에서 그 데이터의 상태를 판단하여야 한다. 이러한 목적을 위해서는 자료획득 시스템으로 FFT 분석기(FFT Analyzer, 또는 Dynamic Signal Analyzer)를 사용하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 휴렛패커드사의 HP35670A 모델을 사용하였다.

4.2 SASW 실험의 자료분석 및 해석

4.2.1 전단강성의 평가

우레탄 그라우팅 시공 전후의 지반강성을 평가하기 위하여 수행된 SASW 실험은 SD, CR 두 축선에서 수행되었으며, SASW 실험축선이 그라우팅 시공전후에 동일한 위치가 되도록 하였고, 결과적으로 동일한 매질에 대한 비교평가가 이루어지도록 하였다. 특히, 축선 CR의 경우 1차 그라우팅의 보강효과가 만족스럽지 않아 2차 그라우팅 시공이 추가로 수행되었었다. 각각에 대한 실험결과인 위상속도 실험분산곡선과 이론실험분산곡선의 비교가 그림 8~12에 도시되어 있다.

현장에서 획득한 위상각 스펙트럼에 대해서 SASW Analyzer(Joh, 2000)을 이용하여 위상속도 실험분산곡선을 결정하였으며, 이들로부터 실험분산곡선의 대표곡선을 구했다. 구한 대표실험분산곡선에 대하여 FitSASW(Joh, 2001)로 배열 역산해석(array inversion analysis;

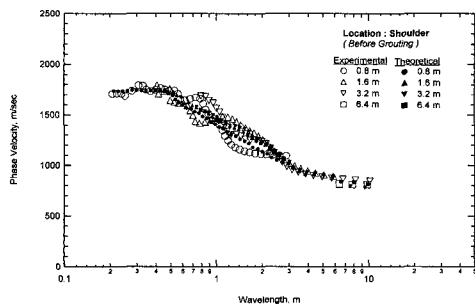


그림 8. 그라우팅 시공전 SASW 축선 SD에서의 분산곡선

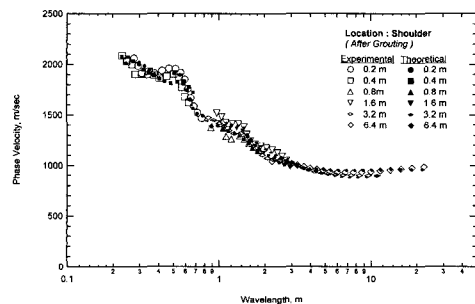


그림 9. 그라우팅 시공후 SASW 축선 SD에서의 분산곡선

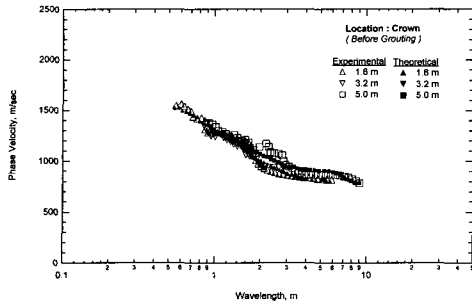


그림 10. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 분산곡선

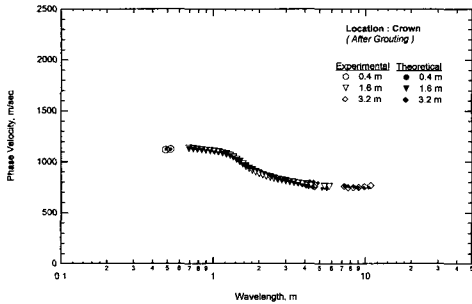


그림 11. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 분산곡선

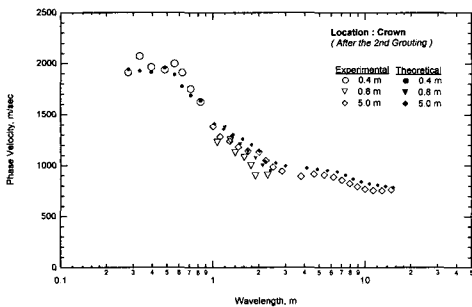


그림 12. 그라우팅 재시공후 SASW 측선 CR에서의 분산곡선

Joh, 1996)을 수행하였으며, 그 결과 그림 13~14의 전단파 속도 주상도를 구할 수 있었다.

SASW 실험에 대한 역산해석의 결과인 그림 13~14의 전단파 속도 주상도를 살펴보면, 측선 SD의 경우는 0.5~1.0m 심도를 제외하고는 전반적으로 전단파 속도가 향상되었으나, 측선 CR의 경우는 측정 심도 전반에 걸쳐 전단파 속도가 그라우팅 시공 후에 오히려 감소한 것으로 나타났다. 이러한 사실은 1차 그라우팅 시공 후에 터널 라이닝 표면에 새로이 나타난 누수현상과 그라우팅 시공시 낮은 그라우팅재의 압력 등의 사실을 참고하여 보면, 측선 CR 지역에서의 그라우팅 주입량이 부족하였음을 확인할 수 있고, 오히려 그라우팅 시공을 위하여 원지반에 수행된 천공작업이 오히려 원지반을 더욱 교란시킨 결과가 되었음을 추정하게 한다. 그러나,

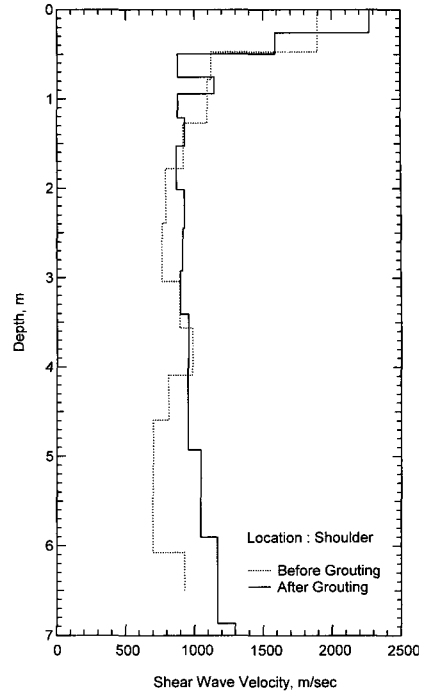


그림 13. SASW 측선 SD에서 역산해석으로 구한 그라우팅 전후의 전단파 속도 비교

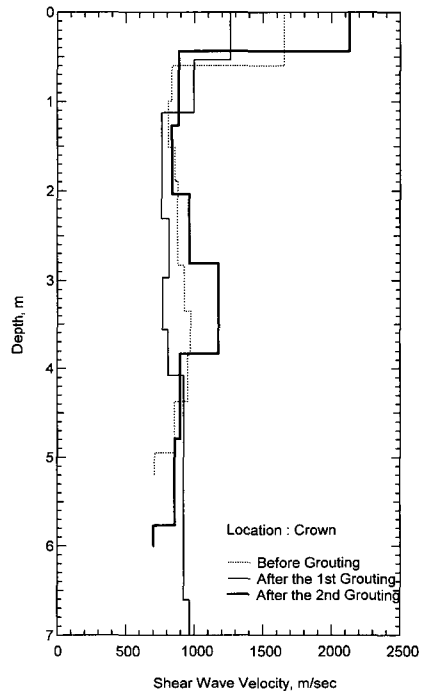


그림 14. SASW 측선 CR에서 역산해석으로 구한 그라우팅 전후의 전단파 속도 비교

측선 CR지역에 수행된 2차 그라우팅 시공에 의해 전체 심도에 걸쳐서 전단파 속도가 그라우팅 시공 전에 비하여 증가되었기에, 2차 그라우팅 시공은 측선 CR 지역에 대해 효과적으로 잘 수행된 것으로 판단된다.

4.2.2 내부공동 및 층 분리의 평가

지반 및 구조물의 하부매질에 대한 진단강성 주상도를 구하기 위한 SASW 실험 자료는, 2.3절에서 언급한 바와 같이 매질 내부에 존재하는 내부공동 및 층 분리 상태를 평가하기 위하여 분석될 수도 있다. 본 절에서는 전 절에서 설명한 바와 같이 측벽부, 어깨부, 천단부의 두측선 중 천단부에서 수행된 SASW 실험자료를 활용하여 터널 원지반 내에 존재하는 내부공동 및 층 분리 현상을 검토하였다.

이는 우레탄 그라우팅 1차 시공으로 인하여 측벽부, 어깨부에서 진단강성의 증진효과가 전반적으로 명확하게 나타난 반면, 천단부에서는 진단강성의 변화가 없는 부분, 증진된 부분과 더불어 다소 감소된 부분이 존재하는 것으로 판단되었고, 그라우팅 1차 시공후 진단강성이 감소된 것이 층 분리에 의한 것인지의 여부를 판단하기 위한 것이다. 그라우팅 2차 시공후의 진단강성은 그라우팅 시공 전보다 현저히 증가된 상황이기 때문에, 본 절에서의 평가는 그라우팅 1차 시공후의 상태에 대해서만 제한적으로 적용되었다. 천단부에서 수행된 SASW 실험 중 0.2m 감진기간 거리를 사용하는 경우를 제외하

고, 0.4, 0.8, 1.6, 2.5m 감진기간 거리에 대한 SASW 실험자료에 대하여 평가하였다. 각각의 SASW 실험자료는 위상스펙트럼과 진폭스펙트럼의 형태로 나타내었으며, 이 중 진폭스펙트럼이 급격하게 하강하여 에너지가 소멸되는 주파수 영역에서 위상각 스펙트럼에 이상현상이 나타나는 것을 조사하였다.

그림 15~24에 그라우팅 시공 전과 후에 대한 위상스펙트럼, 진폭스펙트럼의 비교를 제시하고 있다. 각 스펙트럼을 분석하여 탄성파의 반사면으로 간주될 수 있는 파동의 주파수, 위상각, 파장을 정리하면 아래 표 2와 같다. 특히 파장만을 살펴보면 한 두 개의 파장을 제외하고는 그라우팅 시공 전후에 대체적으로 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나, 감진기간 거리가 1.6m 인 경우, 그라우팅 시공 전후 위상스펙트럼의 경향이 다소 차이가 있음을 알 수 있고, 그라우팅 시공 후 위상속도의 감소가 현저히 나타나고 있지만, 위상스펙트럼의 상태가 매우 양호하게 나타났다. 이는 지반의 교란보다는 SASW 실험측선에 포함되어 있는 지반매질 전체의 강성이 전반적으로 감소한 영향으로 판단되는데, SASW 실험측선에 있어서 우레탄 매질이 차지하는 비중이 증가하여 지

표 2. SASW 실험으로 평가한 파동의 특성

Receiver Spacing (m)	Before Grouting			After Grouting			Remark
	Freq. (Hz)	Phase (Deg)	Wavelength (m)	Freq. (Hz)	Phase (Deg)	Wavelength (m)	
0.4	2368 4224	225.0 376.2	0.64 0.38	1376 4224	180.0 376.2	0.80 0.38	
0.8	-	-	-	1168	332.2	0.87	
1.6	632	26.89	1.73	-	-	-	속도감소
3.2	236 -	319.4 -	3.61 -	264 968	369.13 1068.0	3.12 1.08	
5.0	128.0 356.0 516.0	248.1 605.0 790.3	7.25 2.98 2.28	132 324 452	292.94 652.0 858.56	6.14 2.76 2.09	

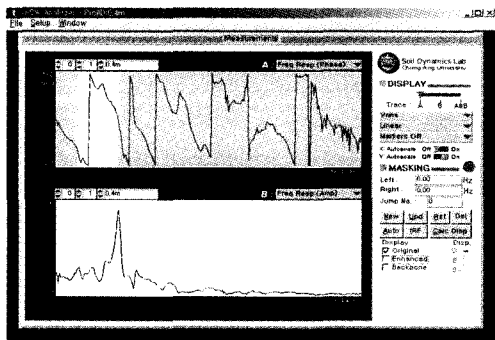


그림 15. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감진기간 거리=0.4m

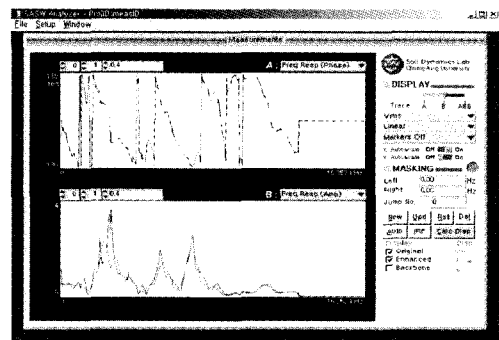


그림 16. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감진기간 거리=0.4m

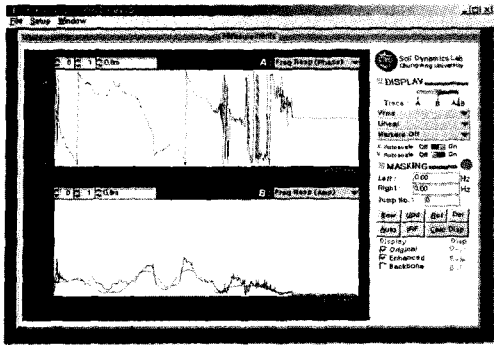


그림 17. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=0.8m

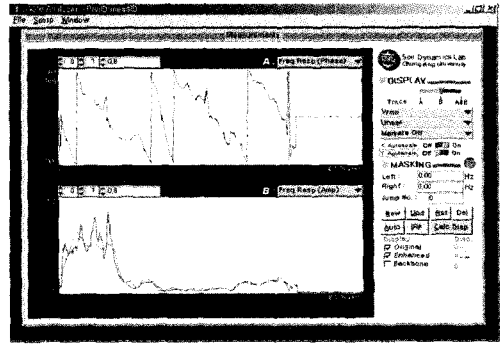


그림 18. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=0.8m

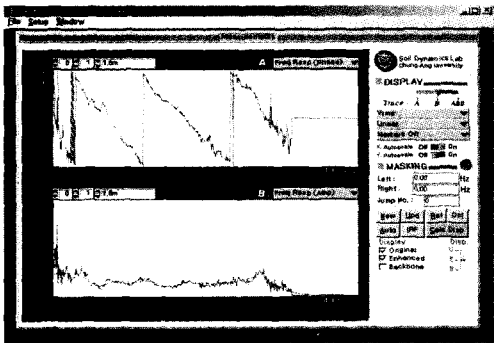


그림 19. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=1.6m

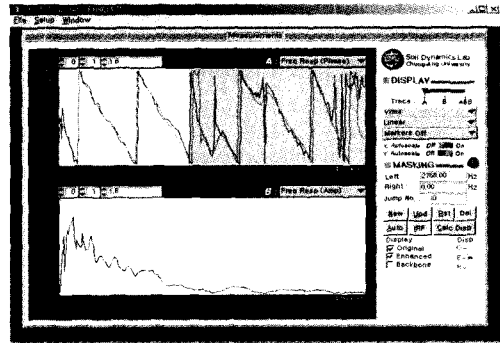


그림 20. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=1.6m

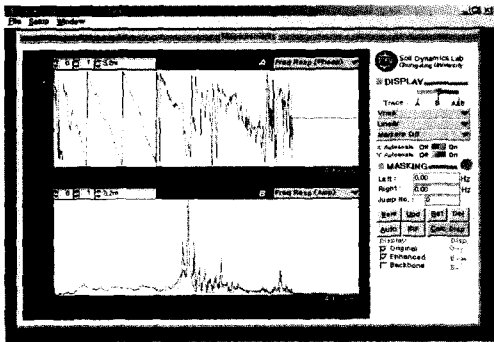


그림 21. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=3.2m

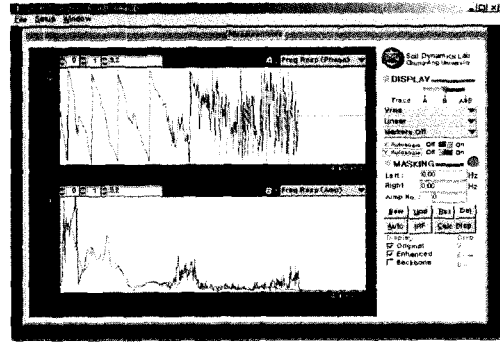


그림 22. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=3.2m

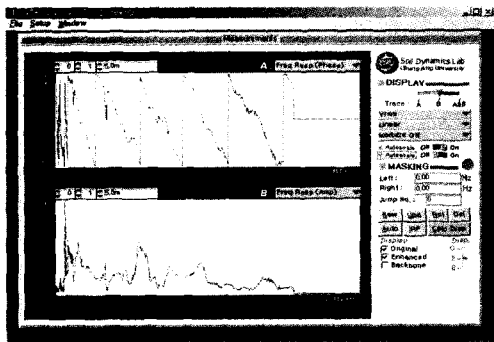


그림 23. 그라우팅 시공전 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=5.0m

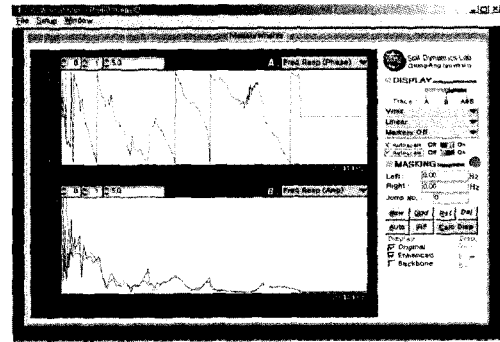


그림 24. 그라우팅 시공후 SASW 측선 CR에서의 스펙트럼: 감지기간 거리=5.0m

반보다는 우레탄 물성이 전체 탄성과 속도를 지배한 것으로 판단된다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 취약한 암반이나 연약한 지반에 터널을 굴착할 때, 암반 또는 지반의 붕괴를 막기 위한 보강 대책인 그라우팅 시공에 대한 성능평가를 위하여 SASW 기법에 의한 방법을 제안하였고, 제안된 방법의 신뢰성 및 적용성을 평가하기 위하여 실제 터널에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 암반의 그라우팅 시공으로 인한 지반보강 효과를 지반의 전단강성 증가 측면에서 확인하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 경기도 ○○터널에 적용한 사례를 살펴보면, 그라우팅 주입이 충분하지 않은 지역에 있어서는 지반의 전단강성이 오히려 감소한 것으로 나타났다. 이는 그라우팅을 위한 천공 작업으로 교란된 지반에 그라우팅재가 충분히 주입되지 못하여 지반의 보강효과는 물론 그라우팅 시공 전의 원지반 상태로 회복되지 못한 것임을 의미하고 있다. 따라서, 그라우팅 시공전후의 지반강성 비교에 의해 그라우팅 시공상태에 대한 상대적인 평가가 가능함을 알 수 있다.
- (2) 한편, 그라우팅 시공으로 인하여 내부에 존재하였던 잠재적인 균열이나 공동이 충전되었는지를 확인하기 위하여, SASW 실험에 의해 측정된 지반의 전달 함수를 이용하였다. 탄성파의 전파특성에 의하면, 내부 공동이나 균열이 존재하는 경우, 특정 주파수에서 공진현상이 일어나는데, 경기도 ○○터널의 경우에 있어서도 그라우팅 시공이 불충분한 경우 내부 공동 또는 균열로 판단되는 부분에 대한 공진현상이 그라우팅 시공이후에도 사라지지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 내부공동 및 균열 확인에 의한 그라우팅 시공평가가 가능하였음을 알 수 있다.

일반적으로 그라우팅에 의한 원지반의 보강은 원지반에 대한 천공하는 과정을 피할 수 없고, 결과적으로 원지반을 오히려 더 교란시키는 결과를 초래할 가능성

이 있는 작업이다. 그러나, 고압으로 그라우팅재를 주입하여 부실한 암괴를 서로 조밀하게 밀착시키고, 또한 암괴사이의 빈 공간을 채워 원지반 내부를 밀실하게 하는 과정이 이어질 때, 원지반의 상태는 그라우팅 전보다 더욱 안정된 상태로 변화될 수 있다. 이러한 측면에서 탄성파의 전파특성을 이용한 그라우팅 보강 평가의 이론적 타당성을 찾아 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999학년도 중앙대학교 연구기자재 구입 지원 프로그램의 도움을 받아 수행한 결과로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Dziewonski, A.M., and Bloch, S., and Landisman, M.(1969), "A Technique for the Analysis of Transient Seismic Signals", *Bull. Seismol. Soc. Am.* 59, pp.427-444.
2. Heisey, J. S., Stokoe, K.-H. II, Hudson, W. R, and Meyer, A. H.(1982), "Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves". Research Report No.256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
3. Hoar, R. J.(1982), "Field Measurement of Seismic Wave Velocity and Attenuation", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 522p.
4. Joh, S.-H.(1996), "Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) measurements". Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
5. Joh, S.-H.(2000), SASW Analyzer: Program to Analyze the SASW Measurements by IRF and Gabor Spectrum, to Develop an Experimental Dispersion Curve, and to Construct Representative Global and Array Dispersion Curves, Chung-Ang University.
6. Joh, S.-H.(2001), FitSASW: Program for Forward Modeling Analysis, Inversion Analysis and Time Trace Generation, Chung-Ang University, Korea.
7. Joh, S.-H. and Stokoe, K. H., II(1997), "Impulse response filtration technique for the determination of phase velocities from SASW measurements". 한국지반공학회지, 제13권, 1호.
8. Stokoe, K. H., II(1980), "Field Measurement of Dynamic Soil Properties", presented to the *Speciality Conference on Civil Engineering and Nuclear Power*, ASCE, Sept. 15-17, Knoxville, TN, 31pp.
9. 조성호, 배규진, 나경준, 이성원, 오상덕(1998), "터널 국부정밀 안전진단을 위한 탄성파 기법의 적용성에 관한 연구", '98 지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.415-422.

(접수일자 2003. 8. 14, 심사완료일 2003. 12. 2)